

doi:10.3799/dqkx.2016.527

白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用

苏 琦¹, 梁明剑², 袁道阳^{1,3*}, 谢 虹^{1,3}, 吴 赵¹

1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000

2. 四川省地震局, 四川成都 610000

3. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃兰州 730000

摘要: 活动构造是影响地质灾害发生的主要因素之一。利用 SRTM-3 数字高程模型(digital elevation model, 简称 DEM)数据, 基于 ArcGIS 空间分析技术及 Matlab 程序脚本系统提取白龙江流域宏观地貌信息、拟合流域内部 7 个 4 级亚流域的 S-A 图解, 并结合流域内部新构造特征、活动断裂分布、岩性展布特征以及降水条件等系统分析了白龙江流域滑坡泥石流地质灾害发育的控制因素。其中, S-A 拟合图形上凸者代表流域内物质的输出量大于输入量, 反之, S-A 拟合图形下凹者代表流域内物质的输出量小于输入量, 而物质输入表现为山体隆升, 较大的物质输出量具体表现形式即为突发事件形成的滑坡、泥石流灾害; 另外区域构造运动控制下的强烈褶皱破碎甚至糜棱化或半糜棱化岩层分布也是地质灾害发生必不可少的条件。受上述因素综合影响, 本区地质灾害通常发生在高程突变、起伏度与切割深度大的高坡度分布区, 而由于区域差异隆升所形成的不同的亚流域地貌形态则控制了地质灾害高发区, 即物质输出量大于输入量的亚流域内部滑坡泥石流等地质灾害频繁, 而输入量大于输出量的亚流域内部并无明显地质灾害分布点。

关键词: 白龙江; 地质灾害; 地貌; 河流水力侵蚀模型。

中图分类号: P65

文章编号: 1000-2383(2016)10-1758-13

收稿日期: 2016-03-25

Geomorphic Features of the Bailongjiang River Drainage Basin and Its Relationship with Geological Disaster

Su Qi¹, Liang Mingjian², Yuan Daoyang^{1,3*}, Xie Hong^{1,3}, Wu Zhao¹

1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2. Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610000, China

3. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, China

Abstract: Active tectonics is one of the factor that impacts the geological disaster. In this paper, the control factors of the geological disasters (landslide and debris flow) in Bailongjiang drainage basin are studied. Based on SRTM-3 Digital Elevation Model, we make use of ArcGIS spatial analysis techniques and Matlab scripts to extract various geomorphic parameters in Bailongjiang drainage basin systematically, such as the macro landform information, seven fitting S-A graphics of four graded rivers. Combined with neotectonic features, active faults, lithological distribution and rainfall condition, the control factors of geodisasters are analyzed. The results show that the convex fitting S-A graphics represents that the material output is bigger than the material input; on the contrary, the concave fitting S-A graphics represents that the material output is less than the material input; among which, the material input performs mountain uplift and the concrete manifestation of material output is landslide, debris flow disaster produced in emergency. In addition, mylonitization or half mylonitization strata distribution controlled by regional tectonic movement is the essential factors for geological disasters. Affected by the comprehensive factors above, it is concluded that geological disasters usually occurs in the region that elevation changes rapidly, high relief amplification.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No.2011BAK12B05); 中国科学院战略性先导科技专项课题(No.XDB03020201).

作者简介: 苏琦(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事活动构造与构造地貌研究. E-mail: xbdsq11@163.com.

* 通讯作者: 袁道阳, E-mail: daoyangy@163.com.

引用格式: 苏琦, 梁明剑, 袁道阳, 等. 2016. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用. 地球科学, 41(10): 1758—1770.

tude and high slope distribution and different sub-basin topography caused by regional differences in uplift control the area where geological disasters occur frequently, that is, geological disasters occur frequently in the sub-basin where material output is bigger than material input and the sub-basin where material input is bigger than material output doesn't show the geological disasters distribution point.

Key words: Bailongjiang river; geological disaster; geomorphology; stream-power incision model.

0 引言

构造地貌学是近年来兴起的地貌学与构造地质学的交叉学科,已广泛应用于造山带系统内部河流地貌的分析、流域地貌与构造活动的响应关系、构造地貌对地质灾害诱发的影响等领域(Kirby *et al.*, 2003; 张会平等, 2006; Wang *et al.*, 2014),尤其是近年来,随着空间分析技术的发展,对于造山带系统内部河流地貌的分析,特别是流域内地形地貌对于地质灾害控制作用的分析,越来越受到众多地质、地貌以及灾害学家的青睐(Istanbulluoglu, 2003; Lin, 2005; Chen, 2011; 谢树成等, 2015)。

白龙江流域地处青藏高原东缘,是一个地质构造和地形地貌极为复杂的地区,同时也是我国滑坡、泥石流等地质灾害最为发育的地区之一,例如 2010

年 8 月 8 日白龙江上游的舟曲县就因遭受强降雨影响爆发的特大型暴洪泥石流地质灾害,给当地人民生命财产安全造成了巨大损失(<http://www.gscn.com.cn/pub/special/2010zt/zqlsl/index.html>)。研究人员对白龙江流域阶地发育过程、岩性特征及其年代的研究证实,该流域曾有过两次泥石流灾害强烈发育的时期(陈洪凯和李吉均, 1997)。同时,沿白龙江流域还发育了一系列近于平行的晚第四纪活动断裂带,主要包括:临潭—宕昌断裂(F_1)、光盖山—迭山断裂(F_2)、迭部—白龙江断裂(F_3)、东昆仑断裂(F_4)以及流域下游的哈南—青山湾—稻畦子断裂(F_5)、文县—康县—略阳断裂(F_6)、青川断裂(F_7)、两当—江洛断裂(F_8)等(图 1)。

活动构造既是地震活动、地形地貌塑造的主要因素,也是影响和制约地质灾害发生的主要因素。本

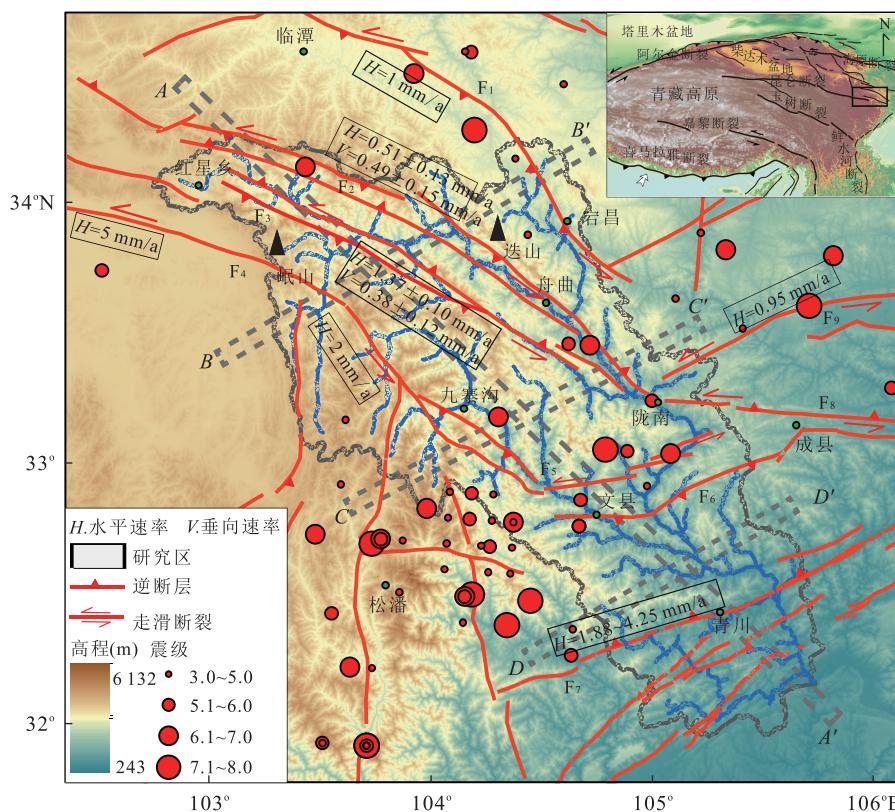


图 1 白龙江流域活动构造分布

Fig.1 Active tectonics' distribution in Bailongjiang drainage basin

F_1 . 临潭—宕昌断裂; F_2 . 光盖山—迭山断裂; F_3 . 迭部—白龙江断裂; F_4 . 东昆仑断裂; F_5 . 哈南—青山湾—稻畦子断裂; F_6 . 文县—康县—略阳断裂; F_7 . 青川断裂; F_8 . 两当—江洛断裂; F_9 . 礼县—罗家堡断裂; $A-A'$ 、 $B-B'$ 、 $C-C'$ 和 $D-D'$ 分别代表 4 条条带状剖面

文以滑坡、泥石流等地质灾害频发的白龙江流域地形地貌特征为研究的切入点,利用数字高程模型(digital elevation model,简称 DEM)提取必要的河流地貌参数并以该区活动构造、岩性分布以及气候条件等作为约束,进行流域地貌与区域地质灾害空间分布特征的相关性探讨。

1 数据与研究方法

1.1 数据来源

本研究所用 DEM 是由美国太空总署和美国国防部国家测绘局联合实施的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)计划获得,数据分为两类:SRTM-1 和 SRTM-3,分别代表 30 m 和 90 m 的分辨率。除美国本土之外的其他地区仅有 SRTM-3 数据实现共享,该数据已被广泛应用于青藏高原构造地貌的分析与研究,本研究使用的也是 SRTM-3 数字高程模型(DEM)数据。

1.2 主要地貌参数

现代地形地貌是在内、外营力共同作用下经过长时间演化形成的。在地貌发育过程中,两种力量同时出现,彼此消长,相互作用,控制和影响了地形地貌发育过程(严钦尚和曾昭璇,2013;杨景春和李有利,2013)。不管是作为内因、还是作为外因,它们塑造地形地貌的过程,也伴随着地质灾害的发生,可以说地质灾害是地形地貌塑造的表现形式之一。

1.2.1 宏观地貌参数 目前,宏观构造地貌定量指标应用已较为广泛,如区域高程、区域地形起伏、切割深度和地形坡度等,对于区域总体地貌特征具有良好的表征意义(刘静等,2006)。其中,区域地形起伏定义为在一定的取样空间内最高高程与最低高程之差,是表现地表势起伏程度或地表粗糙度的量化指数;切割深度是某一点邻域范围内平均高程与最低高程的差值,是宏观表示区域内地表被侵蚀切割程度的重要指标;坡度为过地表某点的切平面与水平地面的夹角,表示地表在该点处的倾斜程度,通常取决于该点与周围各点的相对高程,这些因子不但反映了区域构造地貌特征,也同样蕴含着对地质灾害诱发的影响作用,因此也是分析地质灾害诱因的重要地貌因子。

1.2.2 河流水力侵蚀模型 河水沿着河道流动,同时也侵蚀着河道,河水的侵蚀力对于河道是一种剪应力作用。侵蚀的结果往往造成基岩河道下切,然而,当基岩河道的抬升速率等于河流的下切速率时,

河流发育达到均衡状态,河道高程保持不变($dz/dt = 0$)(Kirby *et al.*, 2003),这时我们定义河流水力侵蚀模型(stream power incision model)为:

$$dz/dt = U - E = U - KA^m S^n, \quad (1)$$

式中: U 为基岩河道的抬升速率; E 为垂直向下的河流下切速率; K 为侵蚀系数; A 为河道上游流域盆地的面积; S 河段坡度; m, n 为经验参数。若 $dz/dt = 0$, 则 $U = KA^m S^n$, 稍加变换可得到:

$$S = (U/K)^{1/n} A^{-m/n}, \quad (2)$$

令 $\Theta = -m/n, k_s = (U/K)^{1/n}$, $S = k_s \times A^\Theta$, 即:

$$\ln S = -\Theta \ln A + \ln k_s, \quad (3)$$

式中: Θ 代表河道凹曲度指标(concavity index); k_s 代表河道陡峭度指标(steepleness index)。由式(3)可知,在坡度—面积的双对数坐标关系图中,流域面积与河段坡度可拟合为一条倾斜的直线,其斜率为 $-\Theta$, 截距为 $\ln k_s$ 。陈彦杰(2008)通过研究台湾地区 27 条河流的地形发育后指出,若河流的下切量大于基岩河道的隆升量,则该河流控制的地形为崩塌山脉地形;若河流的下切量小于基岩河道的隆升量,则受该河流控制的地形为成长山脉地形,而若河流下切量等于基岩河道隆升量,则该处地形为均衡山脉地形;相应地,3 种山脉地形所对应的河流水力侵蚀模型 S-A 图解分别为上凸的曲线、下凹的曲线以及倾斜的直线。联合式(2)、式(3)可知, $k_s = (U/K)^{1/n}$, 由于 K 和 n 分别与流域盆地的演化岩体强度、河床物质以及水文特性有关,则在定量理解 K 与 n 的基础上,陡峭系数 k_s 与基岩隆升速率 U 成正相关关系,即基岩隆升速率越大,河段陡峭指数 k_s 越大,反之亦然。

由此可见,河流陡峭指数和 S-A 图不但反映流域地貌当前的演化状态,而且这种状态与流域地貌的构造隆升和物质输送的平衡关系息息相关,而这些也是直接或间接制约和影响地质灾害发生的重要因素。

2 结果分析

2.1 构造地貌特征

由于受晚第四纪岷山、迭山强烈隆升的影响(赵小麟等,1994),白龙江流域下切侵蚀严重(郭进京等,2006)。利用条带状剖面统计一定区域范围内地形高程的最大、最小和平均值,可半定量一定量分析研究区内山峰、河谷的高程变化以及侵蚀程度(梁明剑等,2014)。本文系统地提取平行于流域盆地走向的 A-A' 剖面和垂直于流域盆地走向的 B-B'、C-

C' 、 $D-D'$ 4 条剖面所穿过的流域盆地的绝对高程以及坡度信息(图 2,位置见图 1).从 $A-A'$ 剖面上可知,整个白龙江流域盆地由北西向南东方向高程逐渐降低,最大高差达 3 500 m,剖面上局部下凹的区域为白龙江及其支流河道所在.然而坡度信息的变化趋势却与高程变化趋势不匹配,在绝对高程缓慢降低的同时,坡度却一直维持在一个较高的范围内($28^{\circ} \sim 36^{\circ}$),直到河流穿过文县汇入嘉陵江时坡度才开始缓慢下落($12^{\circ} \sim 20^{\circ}$),这与该区数条横穿流

域的活动断裂($F_5 \sim F_7$)的挤压逆冲构造活动密切相关.而垂直于流域盆地走向的 $B-B'$ 剖面展布在白龙江流域的上游地区,剖面西侧绝对高程稳定在 3 500~4 000 m 左右,而坡度在最西段一直稳定在 10° 以下,构成高原内部较宽阔平坦的地形地貌特征,但随着向东扩展其坡度快速增加到一个较高的程度($20^{\circ} \sim 24^{\circ}$),在剖面东侧绝对高程起伏较大,局部下凹处为白龙江干流通过处,也是被活动断裂严格控制,造成坡度剧烈变化($F_2 \sim F_3$),而在剖面东侧

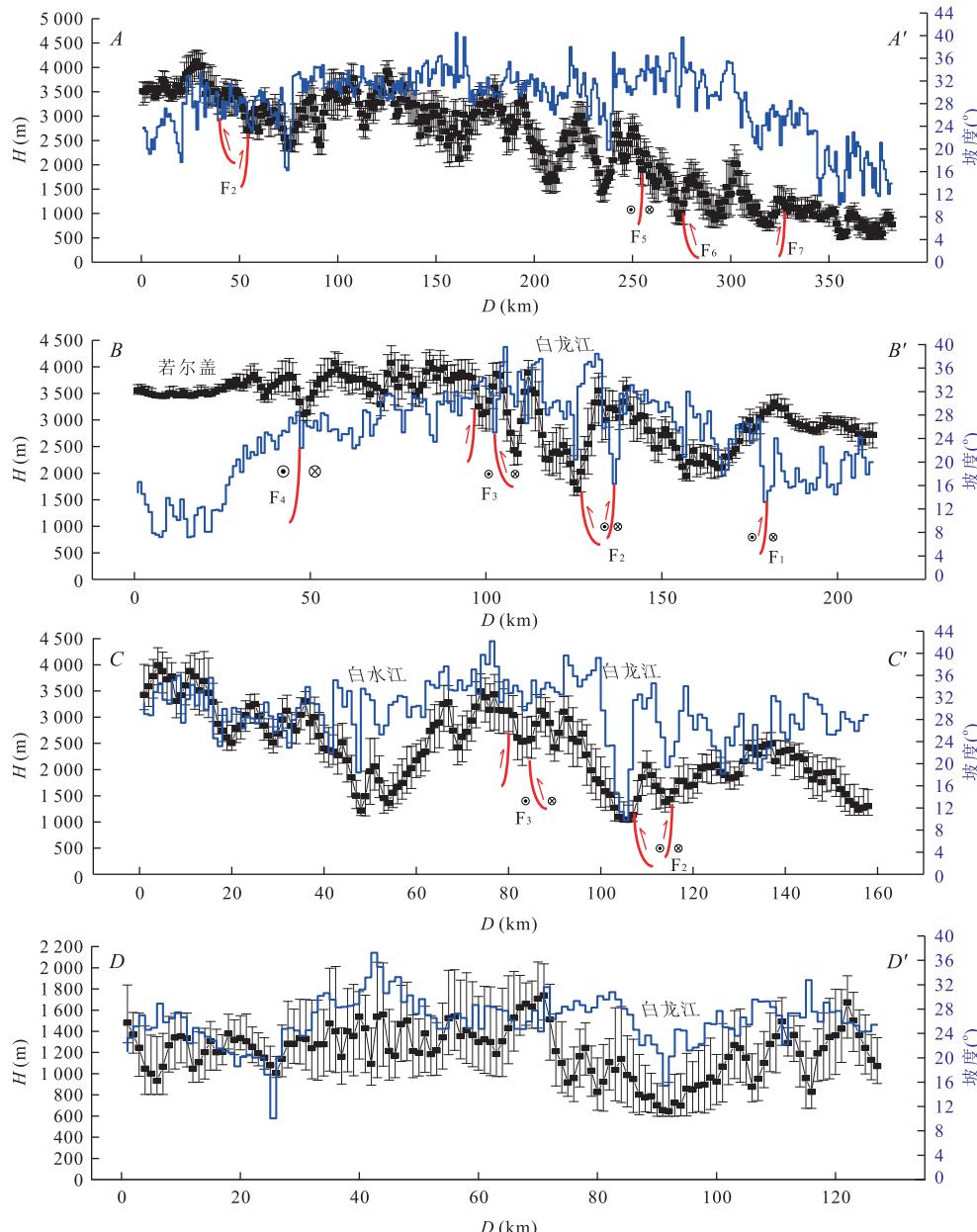


图 2 4 条带状剖面

Fig.2 Four swath profiles

F_1 .临潭—宕昌断裂; F_2 .光盖山—迭山断裂; F_3 .迭部—白龙江断裂; F_4 .东昆仑断裂; F_5 .哈南—青山湾—稻畦子断裂; F_6 .文县—康县—略阳断裂; F_7 .青川断裂

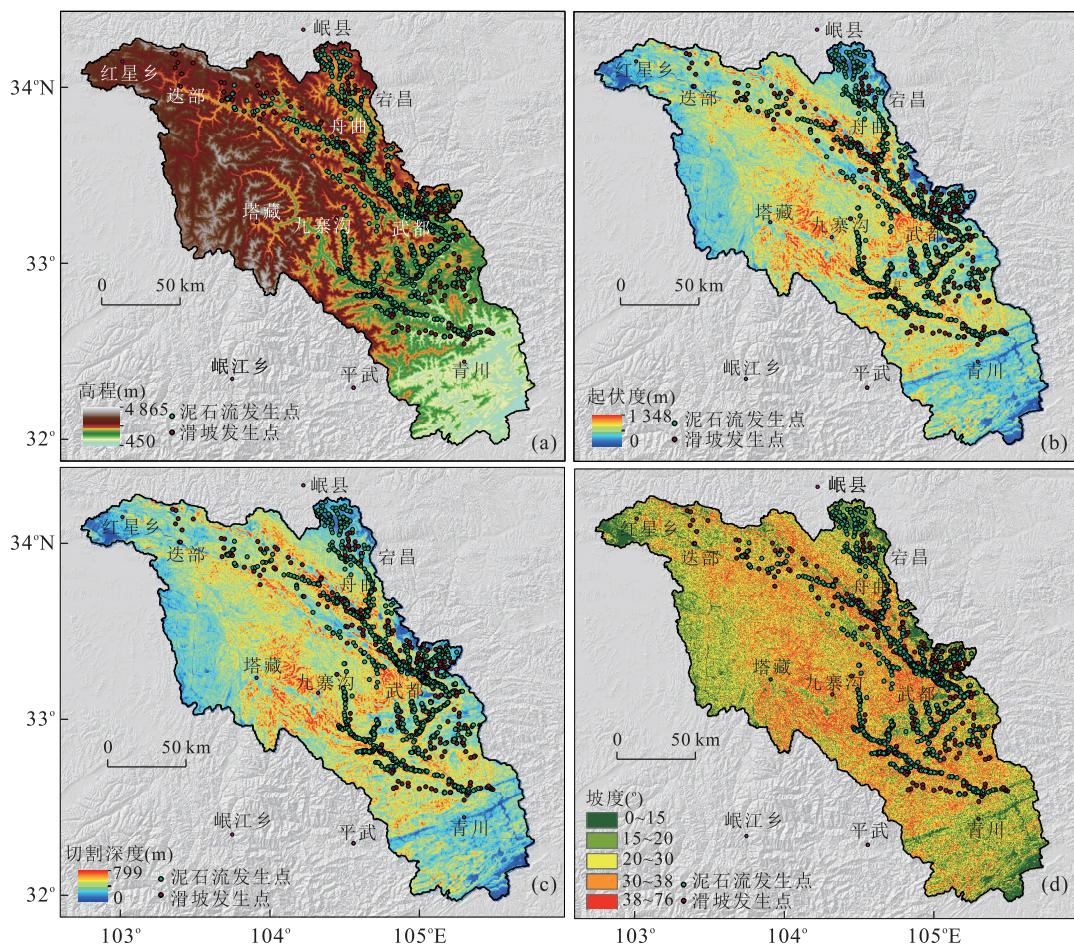


图 3 白龙江流域地貌参数

Fig.3 Integrated topography parameters in Bailongjiang river

a. 地形高程分布; b. 地形起伏度分布; c. 地形切割深度分布; d. 地形坡度分布

坡度值随着绝对高程值的降低相应地降低。展布于流域盆地中下游的 C-C' 与 D-D' 剖面总体高程相对于 B-B' 剖面较小, 但两条剖面的坡度同样具有较高的值; 与 B-B' 剖面相同, 后两条剖面的坡度值同样随着高程信息呈正相关变化, 局部的不一致可能是因为活动断裂的构造活动所产生的影响。

从上述分析可知: 本区地形地貌, 尤其是地形坡度变化明显受区域活动断裂的差异构造活动的影响, 是地貌发育的重要制约因素之一。

2.2 宏观地貌因子

由于白龙江处在青藏高原东缘地貌阶梯带上, 流域内部的地貌特征受构造作用控制明显(张会平等, 2010), 地势陡峭处呈带状分布并与活动断裂走向一致。从白龙江流域地形地貌、起伏度、切割深度和坡度总体分布特征看(图 3), 流域内高程分布极不均匀, 最高峰海拔超过 4 800 m, 而在下游汇入嘉陵江时海拔仅有 450 m, 高程相差近 4 500 m。受区域

降雨条件影响, 流域内部水系极为发育且切割能力强, 整个流域被深切河谷划分为残余中高山区。区域地形起伏的变化范围介于 0~1 340 m, 多数集中在 500~1 000 m 范围内; 与高程分布不同的是, 在流域上游大高程处如迭部、宕昌一带, 起伏度反而较小, 这可能与该区“削高填低”造成的局部地形平缓有关或局部地区为残余的早期夷平面(刘静等, 2006)。切割深度能够很好地表示一定区域内地形被切割、破碎的程度, 在白龙江流域内部, 切割深度与区域地形起伏分布具有很好的相似性, 表现为大的地形起伏区同时也是地表深切割区, 而且切割深度较大的区域也主要分布在白龙江干流及其支流两侧。白龙江流域整体表现出高坡度分布特征, 特别是在流域中上游中高山区起伏度与切割深度均较大的区域地表坡度均有异常高值。

2.3 陡峭度指标

在定量理解 K 与 n 的基础上, 陡峭系数 k_s 与

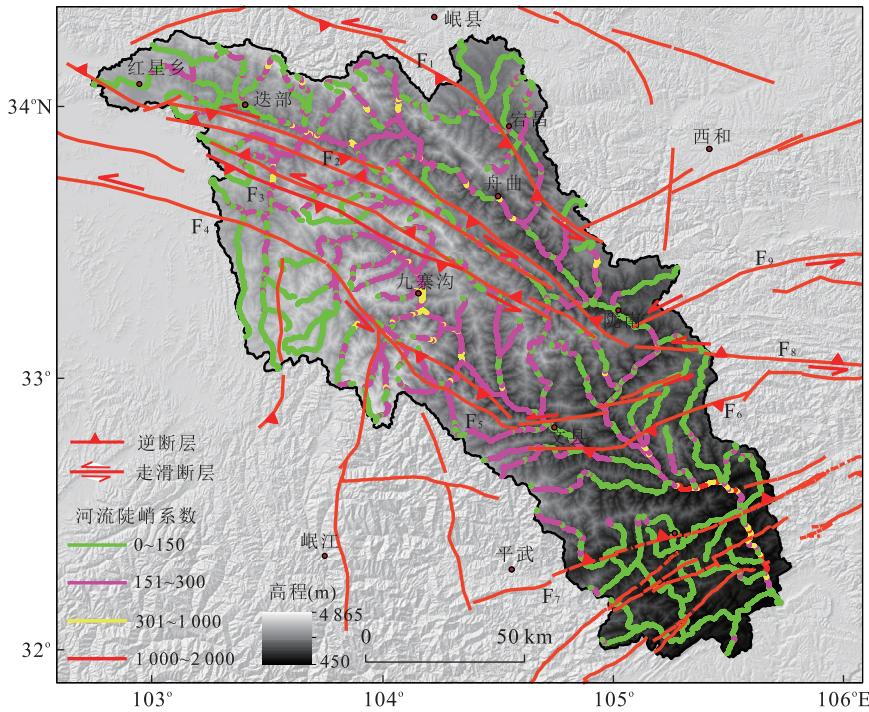


图 4 河流纵剖面陡峭系数分析结果

Fig.4 Channel steepness index result

F₁.临潭—宕昌断裂;F₂.光盖山—迭山断裂;F₃.迭部—白龙江断裂;F₄.东昆仑断裂;F₅.哈南—青山湾—稻畦子断裂;F₆.文县—康县—略阳断裂;F₇.青川断裂;F₈.两当—江洛断裂;F₉.礼县—罗家堡断裂

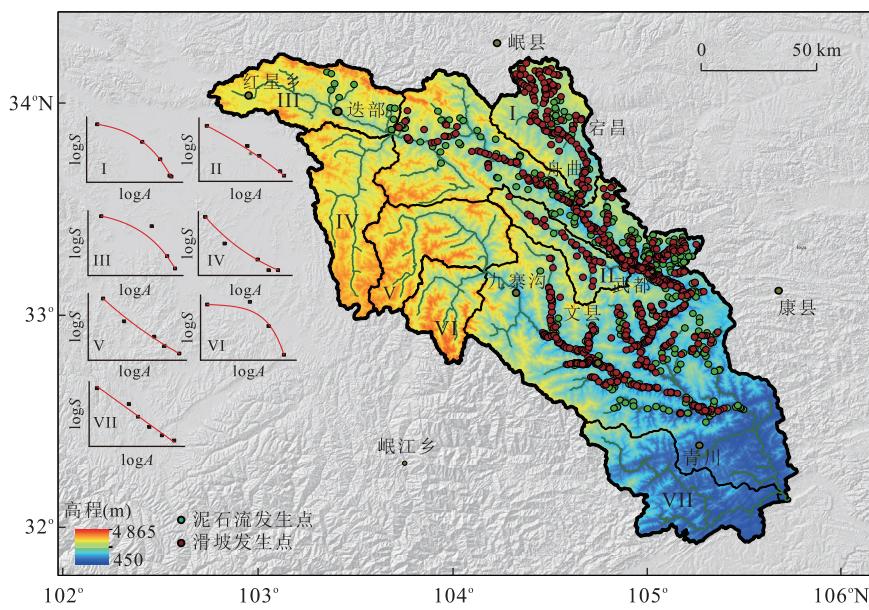


图 5 地质灾害分布

Fig.5 The distribution of geological hazard

I ~ VII 代表 7 条 4 级水系;左侧为对应区域的 S-A 对数曲线

基岩隆升速率 U 之间成正比关系。如图 4 所示,以文县—康县—略阳断裂(F_6)为边界,流域上游岩体的隆升速率明显高于下游,尤其是处于临潭—宕昌断裂(F_1)与光盖山—迭山断裂(F_2)之间的舟曲地区

以及迭部—白龙江断裂(F_3)和东昆仑断裂(F_4)之间的九寨沟地区均具有大的河流陡峭指数,代表了较高的基岩河道隆升速率;流域下游主河段也显示出明显的河流陡峭系数高值异常,这可能与流域西

南一侧的岷江断裂与虎牙断裂有关;由于上述断裂由北西向南东方向持续的挤压逆冲活动,造成北西侧整体隆升,形成高海拔的岷山、迭山山系等较宽阔的构造隆升带(赵小麟等,1994),而在文县—康县断裂以及青川断裂通过之处却是地形急剧变化,坡降明显的地段,其地貌形态类似于川西高原与龙门山前受构造活动影响而形成的显著地貌梯级带(高明星等,2013),从而使得河流下游主干河道快速的侵蚀下切而具有较高的陡峭系数。

2.4 S-A 图解

选取白龙江流域 7 条 4 级水系分别计算其 S-A 图解以确定各支流所在区域物质的输出与输入状况(在崩塌山脉地形中,河流下切量大于基岩河道的抬升量,即流域内物质的输出量大于输入量,而在生长山脉地形中则正好相反;在均衡山脉地形中,物质的输出量等于输入量)(陈彦杰,2008).7 条 4 级水系(亚流域)的分布如图 5 所示,可以明显看出:亚流域 I、II、III 以及 VI 的 S-A 曲线呈现明显的上凸形状,IV、V 有明显的下凹形态而亚流域 VII 呈直线状态并有轻微下凹趋势;根据原理可知流域 S-A 图像上凸则代表该流域属于崩塌山脉地形,即流域内物质的输出量大于输入量;流域物质的输入主要来源于基岩河道(山体)的隆升(李勇等,2006;王岩等,2013),而物质的输出除了河流的侵蚀下切还包括地质历史时期的突发事件如地震造成的大型滑坡、泥石流以及大洪水等(王二七等,2008).

3 控制因素讨论

3.1 构造活动对于地质灾害的控制作用

白龙江流域在大地构造位置上处于南北强震构造带中段与西秦岭构造带的交界区,由于受到该区两条边界走滑活动断裂(东昆仑断裂和西秦岭北缘断裂)的控制和影响,介于二者之间的甘肃东南地区形成多条次级剪切断裂并以逆左旋走滑的形式实现它们之间的构造转换(袁道阳等,2004),这些逆走滑断裂主要包括临潭—宕昌断裂(F_1)、光盖山—迭山断裂(F_2)和迭部—白龙江断裂(F_3)等(图 1).上述这些近于平行的 NWW 向断裂及其东侧的 NEE 向断裂,通过各条断裂相对较低的滑动速率(走滑和逆冲),以及断裂之间隆起山脉及不同时代盆地的变形,共同承担了自东昆仑断裂向西秦岭北缘断裂过渡过程中运动分量的吸收(郑文俊等,2013).同时,研究区内历史及现今强震活动频繁,如在临潭—宕

昌断裂上曾发生过 1837 年岷县北 6 级地震以及 2013 年岷县 6.6 级地震(郑文俊等,2007,2013;何文贵等,2013),在光盖山—迭山断裂上曾发生 842 年碌曲 7 级地震(袁道阳等,2014),而迭部—白龙江断裂是 186 年甘肃武都~7 级地震的发震构造(袁道阳等,2007).大地震会强烈改变地形并在一定时间内影响边坡土体稳定性而断裂的差异活动会使得岩层揉皱、破碎,地震产生的大量松散物质在遭遇强降水之后会成为滑坡泥石流地质灾害的物质来源(Hung, 2000; Zhu et al., 2011).区内新构造活动发育,差异隆升极为明显;活动构造的最新活动及其孕育、发生的地震作用是造成该区地质灾害严重的重要因素之一,例如公元前 86 年武都地震造成“汉高后二年正月地震,羌道、武都道山崩”、“杀七百六十人”(谢毓寿和蔡美彪,1983;袁道阳等,2007);公元 842 年碌曲地震造成“……地震裂,水泉涌,岷山崩,洮水逆流三日……”严重的地质灾害(谢毓寿和蔡美彪,1983;袁道阳等,2014).

3.2 地层岩性的控制作用

白龙江流域地层岩性复杂多样,各时代地层大致沿着河谷流向以及主要断裂构造线的方向呈条带状分布.如图 6 所示,在临潭—宕昌断裂(F_1)与光盖山—迭山断裂(F_2)之间广泛分布有中生代地层,其中以三叠纪碎屑岩、含砾砂岩、普通花岗岩,侏罗纪泥岩、页岩、生物碎屑灰岩以及白垩纪钙质砂、泥岩互层为主;光盖山—迭山断裂与迭部—白龙江断裂(F_3)之间夹持了一整套古生代地层,其中除二叠系含有玄武岩以及苦橄岩类外,多以各个时代的碳酸盐岩、泥岩砂岩以及碎屑岩为主;迭部—白龙江断裂以西广泛分布中生代地层;文县断裂(F_6)以及青川断裂(F_7)沿线主要分布有全新统、古生代以及前寒武纪地层,所含比例略有不同.流域上游古生代与中生代地层有白龙江干流及其支流横切而过且刚好被临潭—宕昌断裂、光盖山—迭山断裂和迭部—白龙江断裂所夹持,三条断裂晚更新世以来强烈的差异运动使得流域内部断层、节理极其发育,岩层强烈褶皱破碎甚至糜棱化或半糜棱化(唐永仪,1992)连同区内广泛的易风化软岩分布一起成为滑坡泥石流等地质灾害的源物质(孟兴民等,2013),即岩性条件的差异是制约滑坡泥石流等地质灾害发育的重要控制因素之一,岩性软弱破碎、遇水易风化,会大大加重地质灾害发生的频度和强度.

结合流域内部滑坡泥石流地质灾害综合分析发现,夹持于迭部—白龙江断裂与临潭—宕昌断裂之

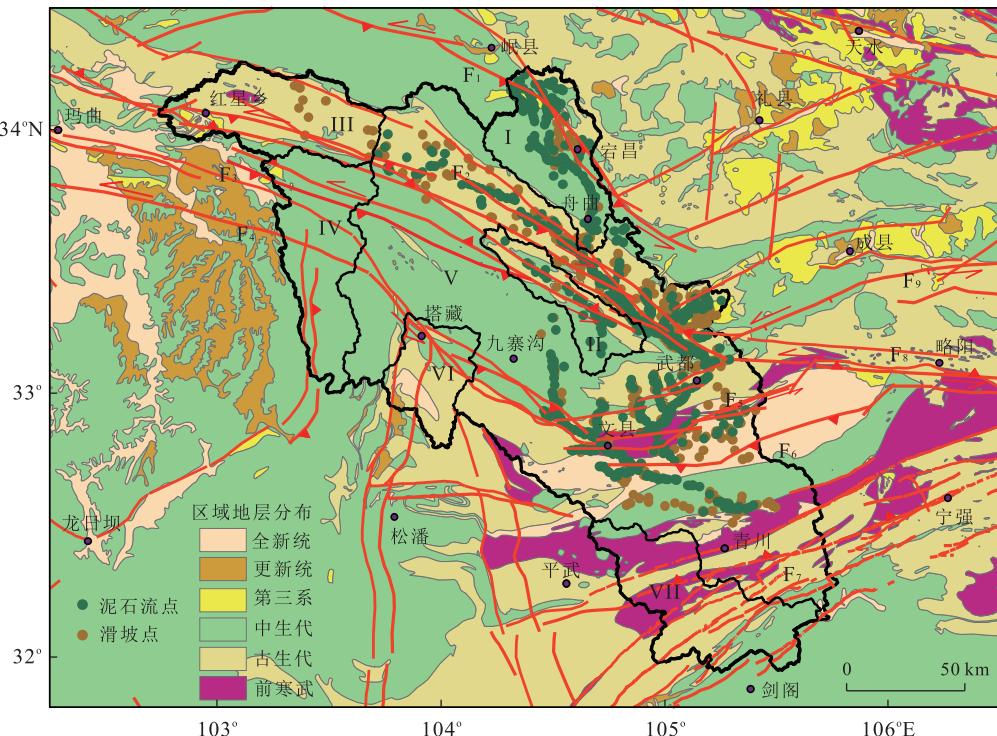


图 6 白龙江流域岩性分布

Fig.6 The plane distribution of different rock types of Bailongjiang drainage

间的古生代与中生代地层发育大量地质灾害而处在东昆仑断裂(F_4)与迭部—白龙江断裂之间的中生代地层确无明显地质灾害分布点,这可能与该区域植被分布不均匀有关。白龙江下游位于中纬度亚热带北缘,属于北亚热带气候;中游河谷地带气候干旱降雨量少,具有干热河谷的特点;上游温带和寒温带气候,冬长而寒冷(康永祥等,1999);区内植被类型具有明显垂直地带性分布(孙学刚等,2000)。不同的气候条件决定了不同的植被发育(中国植被编辑委员会,1983);目前虽无明显证据证明白龙江各流域植被分布对于区内的地质灾害分布有明显的控制作用,但植被分布可通过影响岩石物理、生物风化作用从而达到控制滑坡、泥石流等地质灾害源区物质的作用。

3.3 降水量的控制作用

白龙江流域位于青藏高原、黄土高原以及四川盆地三大不同地貌形态的交接部位,由于同时受到来自印度洋与太平洋高空暖湿气团的影响,研究区内降雨丰富、水量充沛,河流携载能力较强。Hijmans *et al.*(2005)利用全球50年内(1950—2000年)的气象观测资料、采用thin-plate smoothing spline插值方法,并以经度、纬度以及绝对高程作为变量得到了在全球尺度、甚至整个青藏高原尺度内分辨率最高

的降水数据。如图7所示,研究区及邻区的降水明显呈现东南强、西北弱的分布态势,这与东亚季风的流动有关;而在白龙江流域内部,降雨量随高程增高而呈增强的趋势,最强降雨量分布在塔藏、九寨沟西南以及青川县西侧,达到了1000 mm/a,最弱降水量在红星乡、宕昌以及武都一带,年均降水量只有约500 mm/a。然而结合白龙江流域地质灾害分布特征可知,其地质灾害的多发区并不是年降水量最多的区域,一方面可能与区域岩性、植被差异密切相关之外,另一方面可能与区域骤发性强降雨相关(袁斌等,2012)。

3.4 宏观地貌的控制作用

滑坡泥石流等地质灾害与流域内部地形坡度、地貌高差密切相关(张帆宇和刘高,2005;李永进等,2009;殷志强等,2015)。白龙江流域处于西秦岭的中、高山区,晚新生代以来抬升运动强烈,沟谷发育且多呈“V”字形,山坡相对高差一般都在700~1400 m,区域起伏度和切割深度分别达到1300 m和800 m,优势坡度为20°~50°。白龙江流域特别是上游流域具有高程易变、起伏大、切割深、坡度陡等特点,具体表现为流域地貌破碎程度高、地形陡峻、起伏强烈、河流比降大的特点(图3),斜坡越高陡,其坡脚应力越集中,系统稳定性越差,发生变形破坏的

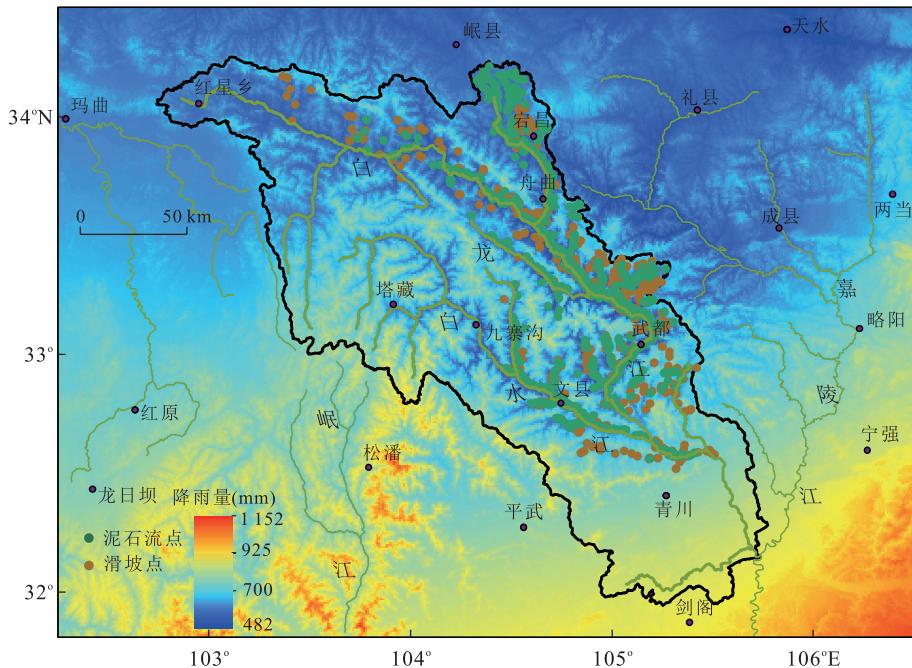


图 7 白龙江流域年均降水量分布

Fig.7 The plane distribution of annual precipitation of Bailongjiang drainage

可能性越大(孟兴民等,2013).高陡的地形为地质灾害的发育和形成提供了必要的势能和物质积累条件而大的河流比降也为滑坡泥石流等地质灾害提供了源源不断的动力.白龙江流域内部滑坡、泥石流易发点分布证明了宏观地貌对于地质灾害的爆发具有较强的控制作用.

3.5 河流侵蚀作用

整个白龙江流域存在明显的差异隆升,流域中上游隆升速率明显大于下游地区,这与该区主干活动断裂的新活动性息息相关(张会平等,2010);已有研究指出,光盖山—迭山主断裂晚第四纪以来的左旋滑动速率为 0.51 ± 0.13 mm/a,垂向滑动速率为 $0.49\pm0.08\sim1.15\pm0.28$ mm/a(俞晶星等,2012);迭部—白龙江北缘断裂晚第四纪以来的逆冲速率为0.70 mm/a,而其南缘断裂晚第四纪逆冲速率为 0.38 ± 0.12 mm/a,走滑速率为 1.37 ± 0.10 mm/a(郑文俊等,2013),而临潭—宕昌断裂最新得到的左旋走滑速率为1.00 mm/a(刘白云,2012)。贾伟(2012)等得到的康县—略阳断裂(F_7)中段的晚更新世以来左旋走滑速率自西向东增大,从0.35 mm/a增大至1.39 mm/a,全新世以来走滑速率从0.68 mm/a增大至1.48 mm/a,东段晚更新世以来平均滑动速率为1.06 mm/a;两当—江洛断裂(F_8)的左旋走滑速率为 $0.50\sim1.50$ mm/a,逆冲速率为 $0.50\sim1.00$ mm/a(刘白云,2012);根据近年地质填

图的结果,哈南—青山湾—稻畦子断裂全新世以来左旋滑动速率为 $2.00\sim2.50\text{ mm/a}$ 。跨过区内断裂,流域西南一侧受岷江断裂与虎牙断裂所控制的岷山隆起于第四纪强烈抬升(赵小麟等,1994),且目前仍在快速隆升(邓起东等,1994),这一明显的差异隆升也向北延伸到了本研究区使得流域中上游大面积快速隆升(张会平等,2010)。整个流域内部明显的差异隆升,尤其是区内活动断裂强烈的晚第四纪构造活动使得研究区内河流下切强烈、地层严重破坏(宋丙辉等,2011;黄晓等,2013),造成了白龙江流域山高谷深、沟壑纵横、岩体破碎、结构松散的总体特征。

7个亚流域所拟合的S-A图解明显不同。亚流域I、II、III、VI的S-A图像明显上凸反映了各流域河流下切侵蚀严重或突发事件形成的滑坡泥石流以及大洪水等造成的物质输出明显。我们将近年来实地调查统计得到的滑坡、泥石流地质灾害分布点叠加到各个亚流域上，发现流域I、II、III确实为地质灾害高发区，也造成了极大的物质输出；而亚流域VI却未见地质灾害分布点，这可能与该区极大的地体隆升速率所造成的河流强烈下切带走冲刷物质有关（图4）。亚流域内部物质输出小于输入的IV、V以及输出量与输入量达到均衡状态的亚流域VII均未见明显的地质灾害分布点。所以，单从流域内部物质的输出与输入角度来看，流域盆地的S-A图像上凸，说明流域所在地区属于崩塌山脉地形，其物质的

输出量大于输入量,而物质的输出通过河流的强烈侵蚀下切或者大型滑坡、泥石流等突发事件来实现;所以滑坡泥石流等地质灾害易于发生在物质输出量大于输入量的流域内。兼顾 7 个亚流域内部的岩层分布发现,各亚流域内部岩层分布有较大差异(图 6):I、IV、V 号以中生代碎屑岩、含砾砂岩为主;II、VI 号同时含有古生代碳酸盐、泥砂岩以及中生代含砾砂岩;III 号古生代碳酸盐、泥沙岩以及玄武岩、苦橄岩夹层;VII 以前寒武纪、古生代及中生代地层为主;流域内部各时代岩层分布似乎并不是控制地质灾害的主要因素,而区域活动断裂差异活动所控制的破碎岩石以及软岩分布才是滑坡泥、石流灾害的源物质。

受控于区域山体隆升以及河水携带动力的物质输出与输入模式分析表明滑坡、泥石流等地质灾害通常发生在物质输出量大于输入量的崩塌山脉地形中,但也要同时考虑降雨、地层分布以及岩石破碎程度等因素。

综上所述,白龙江流域骤发性的大到暴雨以及比降大的陡峭河道使得白龙江具有丰富的水源以及强大的水流携带动力;受断裂构造差异活动而被强烈破碎的坚硬岩石以及遍布全区的软岩分布为流域内滑坡、泥石流等地质灾害提供了丰富的松散物质;流域内部特殊的地貌形态:分布极不均匀的海拔高程、局部异常高的坡度和地形起伏度分布以及流域内部大的切割深度在流域内以地貌破碎程度高、地形陡峻、起伏强烈、河流比降大的形式出现,这样陡峻的地形为各种地质灾害的产生提供了高度、陡度以及临空条件。

4 结论

本文通过 ArcGIS 空间分析技术系统提取白龙江流域内部各地貌因子,在前人工作基础上结合区域降水与岩性条件系统探讨了地貌因子与地质灾害分布的相关性。

分析认为,骤发性暴雨以及陡峭的河道使白龙江水系具有强大的携带动力;受构造作用控制而严重破碎的坚硬岩石以及遍布全区的软岩分布为地质灾害提供了直接的源区物质;白龙江流域极不均匀的高程分布以及高坡度、高地形起伏度以及大的切割深度等特征为各种地质灾害的产生提供了高度、陡度以及临空条件。

通过对白龙江流域内部 7 条四级水系进行河流

水力侵蚀模型分析得到了滑坡泥石流等地质灾害主要分布在 S-A 图解上凸的区域,即输出物质大于输入物质的流域,而大量的输出物质则主要以滑坡、泥石流等地质灾害的形式表现。

致谢:感谢审稿专家和编辑部对本文提出的很好的修改意见和建议。

References

- Chen, C. Y., Yu, F. C., 2011. Morphometric Analysis of Debris Flows and Their Source Areas Using GIS. *Geomorphology*, 129: 287—297. doi:10.1016/j.geomorph.2011.03.002
- Chen, H.K., Li, J.J., 1997. General Approach on Geomorphologic Evolution in Baiongjiang Basin since Quaternary. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 16(1): 15—20(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.C., 2008. Morphotectonic Features of Taiwan Mountain Belt Based on Hypsometric Integral, Topographic Fractals and SL Index (Dissertation). Thesis for Doctor's Degree. National Cheng Kung University, Tainan (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q.D., Chen, S.F., Zhao, X.L., 1994. Tectonics, Seismicity and Dynamic of Longmenshan Mountains and Its Adjacent Regions. *Seismology and Geology*, 16 (4): 389—402(in Chinese with English abstract).
- Editorial Committee of China Vegetation, 1983. *China Vegetation*. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Gao, M.X., Xu, X.W., Liu, S.F., 2013. Topographic Difference and Morphologic Evolution between the Two Sides of the Northern Margin of West Qinling-Lajishan Fault. *Seismology and Geology*, 35(2): 221—233 (in Chinese with English abstract).
- Guo, J. J., Han, W. F., Liang, S. Y., 2006. Tectono-Morphological Evolution of the Minxian-Wudu Area on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau and Plateau Uplift. *Geology in China*, 33(2): 283—392 (in Chinese with English abstract).
- He, W.G., Zheng, W.J., Wang, A.G., et al., 2000. New Activities of Lintan-Dangchang Fault and Its Relations to Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(4): 751—760 (in Chinese with English abstract).
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., et al., 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965—1978. doi:10.1002/joc.1276
- Huang, X., Yang, W.M., Zhang, C.S., et al., 2013. Deformation Characteristics and Formation Mechanism of Xieli-

- upo Landslide in Zhouqu. *Journal of Geomechanics*, 19(2): 178—187(in Chinese with English abstract).
- Hung, J.J., 2000. Chi-Chi Earthquake Induced Landslides in Taiwan. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2(2): 25—33.
- Iatanbulluoglu, E., Tarboton, D.G., Pack, R.T., 2003. A Sediment Transport Model for Incision of Gullies on Steep Topography. *Water Resources Research*, 39(4): 1103. doi:10.1029/2002WR001467.
- Jia, W., 2012. Activity on Kangxian-Wudu Fault Zone and Its Seismic Hazard Assessment (Dissertation). Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Kang, Y.X., Chen, Y.P., Li, J.X., et al., 1999. The Characteristics of the Woody Plants Flora in Bailongjiang Watershed. *Acta Botanica Boreal-Occident Sinica*, 19(2): 337—343(in Chinese with English abstract).
- Kirby, E., Whipple, K.X., Tang, W.Q., et al., 2003. Distribution of Active Rock Uplift along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau: Inferences from Bedrock Channel Longitudinal Profiles. *Journal of Geophysical Research*, 108(B4): 2217.doi:10.1029/2001JB000861.
- Li, Y., Densmore, A. L., Zhou, R.J., et al., 2006. Profiles of Digital Elevation Models (DEM) Crossing the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Their Constraints on Dissection Depths and Incision Rates of Late Cenozoic Rivers. *Quaternary Sciences*, 26(2): 236—243 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.J., Ye, L.E., 2009. An Analysis of the Disaster Characteristics of the 512 Wenchuan Earthquake in Wudu Region. *Journal of Gansu Sciences*, 21(2): 29—32 (in Chinese with English abstract).
- Liang, M.J., Li, D.H., Guo, H.M., et al., 2014. Quaternary Tectonic Deformation and Geomorphologic Response Characteristics in the Southern Margin of Chengdu Basin. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(1): 98—106 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M.L., Wang, K.L., Huang, J.J., 2005. Debris Flow Run Off Simulation and Verification-Case Study of Chen-You-Lan Watershed, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3): 439—445.
- Liu, B.Y., 2012. Study on Seismologic Tectonic and Mechanism on Two M8 Historical Earthquakes at the Southeast Area, Gansu Province. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Ding, L., Zeng, L.S., et al., 2006. Large-Scale Terrain Analysis of Selected Region of the Tibetan Plateau: Discussion on the Origin of Plateau Planation Surface. *Earth Science Frontiers*, 13(5): 285—299 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. M., Chen, G., Guo, P., et al., 2013. Research of Landslide and Debris Flows in Bailing River Basin: Progress and Prospect. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(4): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Song, B.H., Chen, W.W., Wu, W.J., et al., 2011. Microstructure Fractal of Sliding Zone Soil of Souertou Landslide in Zhouqu. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(1): 292—297 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X.G., Wang, C.L., Wang, Z.T., et al., 2000. Notes on the Orchid Flora in the Gannan Forest Region, Gansu. *Journal of Gansu Agricultural University*, 35(1): 90—96 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y.Y., 1992. The Effect of Neotectonic Movement on Formations of Landslide and Debris Flow in Southern Gansu. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 28(4): 152—160 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E.C., Meng, Q.R., 2008. Discussion of the Longmen Shan Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1221—1233 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Liu, S.F., 2013. Quantitative Research on Longmen Shan Uplift Caused by Late Cenozoic Isostatic Rebound. *Geoscience*, 27(2): 239—247 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.Z., Zhang, H.P., Zheng, D.W., et al., 2014. Controls on Decadal Erosion Rates in Qilian Shan: Re-Evaluation and New Insights into Landscape Evolution in North-East Tibet. *Geomorphology*, 223(15): 117—128. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.002
- Whipple, K.X., Kirby, E., Brocklehurst, S.H., 1999. Geomorphic Limits to Climate-Induced Increases in Topographic Relief. *Nature*, 401 (6748): 39—43. doi: 10.1038/43375
- Xie, S.C., Hu, C.Y., Gu, Y.S., et al., 2015. Paleohydrological Variation since 13 ka BP in Middle Yangtze Region. *Earth Science*, 40(2): 198—205 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y.S., Cai, M.B., 1983. Summary of the Chinese Historical Earthquake Records (Vol 1). Science Press, Beijing, 96 (in Chinese).
- Yan, Q.S., Zeng, Z.X., 2013. *Geomorphology*. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Yang, J.C., Li, Y.L., 2013. *Principle of Geomorphology*. Peking University Press, Beijing, 21—72 (in Chinese).
- Yin, Z.Q., Xu, Y.Q., Chen, H.Q., et al., 2015. Study on the Dis-

- tribution Characteristics of Geohazards and the Causative Tectonic of the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China. *Quaternary Sciences*, 35(1): 88—99(in Chinese with English abstract).
- Yu, J.X., Zheng, W.J., Yuan, D.Y., et al., 2012. Late Quaternary Active Characteristics and Slip-Rate of Pinding-Huama Fault, the Eastern Segment of Guangaishan-Dieshan Fault Zone (West Qinling Mountain). *Quaternary Sciences*, 32(5): 957—967(in Chinese with English abstract).
- Yuan, B., He, F.G., Li, J.P., et al., 2012. Relationship between Debris Flow Activity and Precipitation Characteristics in Wudu Area, Gansu Province. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 48(6): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, D.Y., Lei, Z.S., He, W.G., et al., 2007. Textual Research of Wudu Earthquake in 186 BC in Gansu Province, China and Discussion on Its Causative Structure. *Acta Seismologica Sinica*, 29(6): 654—663(in Chinese with English abstract).
- Yuan, D.Y., Lei, Z.S., Liu, X.W., et al., 2014. Textural Research of Luqu Earthquake in 842 AD in Gansu Province and Analysis of Its Causative Structure. *Seismology and Geology*, 36(3): 1—16(in Chinese with English abstract).
- Yuan, D.Y., Zhang, P.Z., Liu, B.C., et al., 2004. Geometrical Imagery and Tectonic Transformation of Late Quaternary Active Tectonics in Northeastern Margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 270—276(in Chinese with English abstract).
- Zhang, F.Y., Liu, G., 2005. Characteristics and Mechanism of Landslides along the Fujin River Section of the National Highway G212. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 16(2): 130—134(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.P., Yang, N., Zhang, Y.Q., et al., 2006. Geomorphology of the Minjiang Drainage System (Sichuan, China) and Its Structural Implications. *Quaternary Sciences*, 26(1): 126—135(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.P., Zhang, P.Z., Yuan, D.Y., et al., 2012. Differential Landscape Development of the Central N-S Seismic Zone and Its Relation to the West Qinling Tectonic Belt. *Quaternary Sciences*, 30(4): 803—811 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.L., Deng, Q.D., Chen, S.F., 1994. Tectonic Geomorphology of the Minshan Uplift in Western Sichuan, Southwestern China. *Seismology and Geology*, 16(4): 429—439(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W.J., Lei, Z.S., Yuan, D.Y., et al., 2007. Structural Research on the 1837 Northern Minxian M6 Earthquake in Gansu Province and Its Causative Structure. *Earthquake*, 27(1): 120—130(in Chinese with English abstract).
- Zheng, W.J., Yuan, D.Y., He, W.G., et al., 2013. Geometric Pattern and Active Tectonics in Southeastern Gansu Province: Discussion on Seismogenic Mechanism of the Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake on July 22, 2013. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4058—4071(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J., Ding, J., Liang, J.T., 2011. Influences of the Wenchuan Earthquake on Sediment Supply of Debris Flows. *Journal of Mountain Science*, 8(2): 270—277. doi: 10.1007/s11629-011-2114-7

附中文参考文献

- 陈洪凯,李吉均,1997.白龙江流域第四纪以来地貌发育基本模式研究.重庆交通大学学报,16(1):15—20.
- 陈彦杰,2008.台湾山脉的构造地形指标特性——以面积高积分、地形碎形参数与河流坡降指标为依据(博士学位论文).台南:国立成功大学地球科学研究所.
- 邓起东,陈社发,赵小麟,1994.龙门山及其临区的构造和地震活动及动力学.地震地质,16(4):389—402.
- 高明星,徐锡伟,刘少峰,2013.西秦岭北缘—拉脊山两侧地貌差异及地貌演化.地震地质,35(2):221—233.
- 郭进京,韩文峰,梁收运,2006.青藏高原东北缘岷县—武都地区构造地貌演化与高原隆升.中国地质,33(2): 283—392.
- 何文贵,郑文俊,王爱国,等,2013.临潭—宕昌断裂新活动特征与岷县漳县Ms 6.6 地震关系研究.地震工程学报,35(4):751—760.
- 黄晓,杨为民,张春山,等,2013.舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理.地质力学学报,19(2):178—187.
- 贾伟,2012.康县—武都断裂新活动性及其地震危险性研究(硕士学位论文).兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 康永祥,陈亚萍,李景侠,等,1999.白龙江流域木本植物区系特征.西北植物学报,19(2):337—343.
- 李永进,叶伟林,2009.“5·12”汶川地震在武都区造成灾害的特点分析.甘肃科学学报,21(2):29—32.
- 李勇,Densmore, A.L.,周荣军,等,2006.青藏高原东缘数字高程剖面及其对晚新生代河流下切深度和下切速率的约束.第四纪研究,26(2):236—243.
- 梁明剑,李大虎,郭红梅,等,2014.成都盆地南缘第四纪构造变形及地貌响应特征.地震工程学报,36(1):98—106.
- 刘静,丁林,曾令森,等,2006.青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原“夷平面”的讨论.地学前缘,13(5): 285—299.
- 刘白云,2012.甘东南地区两次8级历史疑难地震发震构造与发展机制研究(硕士学位论文).兰州:中国地震局兰

- 州地震研究所.
- 孟兴民,陈冠,郭鹏,等,2013.白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望.海洋地质与第四纪地质,33(4):1—14.
- 宋丙辉,谌文武,吴玮江,等,2011.舟曲锁儿头滑坡滑带土微结构的分形研究.岩土工程学报,33(1):292—297.
- 孙学刚,王存禄,王忠涛,等,2000.甘南林区兰科植物区系的研究.甘肃农业大学学报,35(1):90—96.
- 唐永仪,1992.新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用.兰州大学学报(自然科学版),28(4):152—160.
- 王二七,孟庆仁,2008.对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论.中国科学(D辑),38(10):1221—1233.
- 王岩,刘少峰,2013.龙门山晚新生代均衡反弹隆升的定量研究.现代地质,27(2):239—247.
- 谢树成,胡超涌,顾延生,等,2015.最近 13 ka 以来长江中游古水文变化.地球科学,40(2):198—205.
- 谢毓寿,蔡美彪,1983.中国地震历史资料汇编(第一卷).北京:科学出版社,96.
- 严钦尚,曾昭璇,2013.地貌学.北京:高等教育出版社.
- 杨景春,李有利,2013.地貌学原理.北京:北京大学出版社.
- 殷志强,徐永强,陈红旗,等,2015.2013 年甘肃岷县—漳县 Ms 6.6 级地震地质灾害展布特征及主控因素研究.第四纪研究,35(1):88—99.
- 俞晶星,郑文俊,袁道阳,等,2012.西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率.第四纪研究,32(5):957—967.
- 袁斌,和法国,李军鹏,等,2012.甘肃武都区泥石流活动与降雨特征关系.兰州大学学报(自然科学版),48(6):15—20.
- 袁道阳,雷中生,何文贵,等,2007.公元前 186 年甘肃武都地震考证与发震构造探讨.地震学报,29(6):654—663.
- 袁道阳,雷中生,刘兴旺,等,2014.公元 842 年甘肃碌曲地震考证与发震构造分析.地震地质,36(3):1—16.
- 袁道阳,张培震,刘百篪,等,2004.青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换.地质学报,78(2):270—276.
- 张帆宇,刘高,2005.国道 212 线福津河段滑坡发育特征及成因分析.地质灾害与环境保护,16(2):130—134.
- 张会平,扬农,张岳桥,等,2006.岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义.第四纪研究,26(1):126—135.
- 张会平,张培震,袁道阳,等,2012.南北地震带中段地貌发育差异性及其与西秦岭构造带关系初探.第四纪研究,30(4):803—811.
- 赵小麟,邓起东,陈社发,1994.岷山隆起的构造地貌学研究.地震地质,16(4):429—439.
- 郑文俊,雷中生,袁道阳,等,2007.1837 年甘肃岷县北 6 级地震考证与发震构造分析.地震,27(1):120—130.
- 郑文俊,袁道阳,何文贵,等,2013.甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 Ms 6.6 级地震孕震机制.地球物理学报,56(12):4058—4071.
- 中国植被编辑委员会,1983.中国植被.北京:科学出版社,788—1022.